セルオートマトンモデルによる
交通流解析

平成 12 年 2 月 4 日

情報電子工学科 竹野研究室
木原 修

目 次

1 はじめに **1**

2 流体モデル **1**

2.1 3 つの基本量 1

2.2 3 変数の関係 3

2.3 車の数の保存 3

2.4 速度と密度の関係 5

2.5 交通量と密度の関係 5

3 セルオートマトンモデル **7**

3.1 セルオートマトンモデルとは 7

3.2 セルオートマトンモデルにおける基本量の定義 9

3.2.1 3 つの基本量 9

3.2.2 進行波解 12

3.3 モデル 184 のシミュレーション例 15

3.3.1 開放境界条件 16

3.3.2 周期境界条件 17

3.3.3 事故渋滞について 18

4 セルオートマトンモデルの改良 **20**

4.1 K.Nagel , M.Schreckenberg モデル 20

4.1.1 モデルのルール 20

4.1.2 シミュレーション例 22

5 様々なシミュレーション **25**

5.1 確率 p の変化による影響 25

5.1.1 シミュレーション結果 25

5.1.2 考察 25

5.2 最高速度制限を区間によって変化させた場合の影響 27

5.2.1 シミュレーション結果 27

5.2.2 考察 27

5.3 最高速度制限を区間によって変化させた場合の影響 (2) 29

5.3.1 シミュレーション結果 29

5.3.2 考察 30

6 まとめ **31**

参考文献 **33**

概要

セルオートマトンモデルを用いて交通流をミクロな観点から考察する。セルオートマトンモデルは、ある空間が与えられたときに、その空間を均一のセルで敷き詰め、隣り合うセルとの相互作用を繰り返すことにより、その後の挙動、振舞いなどを発生させていくものである。本稿では、まず、ミクロな観点との比較の意味で、マクロな観点である流体モデルの基本量について述べ、そしてミクロな観点であるセルオートマトンモデルの基本量の定義について考える。セルオートマトンモデルは、観点の違いから、流体モデルの基本量の定義がそのまま使うことができないため、セルオートマトンモデルにおいて基本量が定義できるような状況を取り上げ、その上での基本量の関係について考察する。次に、このモデルのシミュレーション結果から考察を行い、またこのモデルを変形し、事故による状況を考えたモデルのシミュレーション結果を示し、渋滞について考察する。さらに、このモデルに車の加速と減速を取り入れてより実際の交通に近づけた K.Nagel と M.Schreckenberg のモデルを取り上げ、このモデルをシミュレーションし、その結果からモデルのルールについて考察する。その後、この K.Nagel と M.Schreckenberg のモデルにいくつかの条件を付け加えることで、登り坂、カーブの影響をセルオートマトンモデルで実現させるために、いろいろな条件下でのシミュレーション結果を示し、考察を重ねていく。その結果得られた、低い密度での坂による影響について紹介し、考察する。

1　はじめに

交通流に対する理論的なアプローチは、主に 3 つある。それは、交通流を連続なものとして扱うマクロなアプローチ、交通流を構成している車 1 台 1 台を個別に扱うミクロなアプローチ、それと確率論的な手法を用いたアプローチである。それぞれの代表的なモデルとして、マクロなアプローチでは流体モデル、ミクロなアプローチでは追従モデルやセルオートマトンモデル、確率論的なアプローチでは待ち行列を用いた理論、が挙げられる。マクロや確率論からのアプローチは古くから行われており、ミクロからのアプローチははるかに遅れていた。しかし、計算機技術の発達に伴い、計算機上でのシミュレーションが盛んに行われるようになり、ミクロからのアプローチがここ数年の間に非常に発展してきている。

本稿では、セルオートマトンモデルと呼ばれるモデルを用いて、交通流をミクロ的な観点から考察することを目的とする。第 2 章では、セルオートマトンモデルとの比較の意味で、マクロ的な観点から流体モデルでの基本量の定義について述べる。交通流では、交通量、密度、速度の 3 つが基本量である。この 3 つの要素からそれぞれの関係について調べていく。第 3 章からは本題であるセルオートマトンモデルについて見ていく。まず始めに、セルオートマトンモデル 184 は粒子モデルに属するため、流体モデルでの基本量の定義がそのままでは使うことができない。そこで、セルオートマトンモデルにおける基本量の定義について考え、このモデルの数値計算結果を示す。さらに、このモデルを改良することでより実際の交通流に近付けた K.Nagel と M.Schreckenberg のモデルの例を取り上げ、どういう規則、あるいはどういうモデルが実際の交通状況をより与えてくれるかについて考え、実際の道路に存在する登り坂、カーブをセルオートマトンモデルで実現させるための改良を行なっていく。

2　流体モデル

流体モデルは、1956 年に Lighthill と Whitham により、またそれとは独立に 1956 年に Richards によって、交通流のモデルとして考え出されたものである。これは、[流量 q と密度 ρ がそれぞれの場所 x で関数関係 $q = f(\rho(x))$ として与えられていれば、どのような一次元の流れの問題においても適用できる] という理論である (湯川 [3])。これは、通常の古典的な波と違い、Newton の運動方程式を使わず、流量 q と密度 ρ に関する連続の方程式のみで決まるところから kinematic wave 理論とも呼ばれる。

2.1　3 つの基本量

交通流を考えていく上での基本量は交通量、密度、速度である。まずここでは、この 3 つの基本量の定義について考えていく。

- 交通量

  道路上のある位置に止まっている観測者は、そこをある時間内に通過する車の数を測定することができる。その単位時間当りの量が交通量とよばれ、q で表す。q は位置、時刻に依存するので位置を x、時刻を t とすれば、

$$q = q(x,t) \tag{2.1}$$

  と表すことができる。

- 密度

  ある時刻 t において、与えられた領域内の車の数を測定することができる。領域内に入りきらなかった車は、分数にする、あるいは数えないことにするなど、ある決まった方法で処理する。この測定法によりある与えられた距離の道路上にいる車の数がわかる。この単位長さ当りの台数を車の密度といい、ρ で表す。車長を L、車間距離を d とすると密度は

$$\rho = \frac{1}{L+d} \tag{2.2}$$

  と表すことができる。(Fig. 2.1 参照)

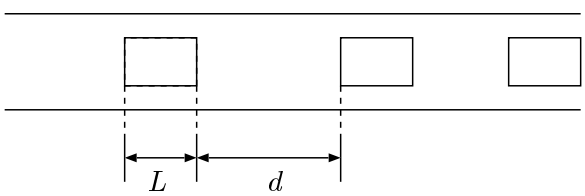

Fig. 2.1 密度

- 速度

  速度を測定する方法は 2 つある。最も一般的なものは、個々の車の速度を測ることである。時刻 t のとき、車の位置 x が t の関数で表されるならば、速度も t の関数で表すことができる。すなわち、

$$v = v(t) = \frac{dx(t)}{dt} \tag{2.3}$$

  となる。

  しかし、N 台の車が存在する場合、N 台のそれぞれに異なった速度 $v_i(t)(i = 1, 2, 3, ... , N)$ を考えなければいけないため、N が大きくなればなるほど測定が困難なものとなる。

そこでもう 1 つの方法として、空間の各点、各時刻に対し速度場と呼ばれるただ 1 つの速度、すなわち、$v = v(x,t)$ を考える。i 台目の車の、時刻 t_j での位置を $x_i(t_j)$ とすると、そこでの速度場は、$v(x_i(t_j), t_j)$ と表すことができる。位置 $x_i(t_j)$ における速度場は、そこにいる車の速度と同じでなければならない。したがって、

$$v(x_i(t_j), t_j) = v_i(t_j) \tag{2.4}$$

が成立する。

2.2 3 変数の関係

基本量であるこの 3 つの変数の間には密接な関係がある。ある道路で定速 v_0、定密度 ρ_0 で車が動いているとする。各々の車は定速で動いているため、車間距離は一定に保たれている。よって、車の密度は変化しない。交通量は、観測者を基準に考えると、ある時間 T の間に各車は v_0T だけ動くので、観測者の前を通過する車の数は距離 v_0T における車の数に等しい。これより、時間 T の間に観測者の前を通過する車の数は、$\rho_0 v_0 T$ と表せる。したがって、単位時間あたりの交通量は、

$$q = \rho_0 v_0 \tag{2.5}$$

である。

定速、定密度でない場合は、速度、密度は一定でないため、観測場所によってこれらの値は変化する。そこで交通量を非常に短い時間で考えてみる。ある時刻 t_1 での車の速度を v_1 とすると、t_1 から $(t_1 + \Delta t)$ までの時間に車が進む距離は、十分小さい Δt に対しては $v_1 \Delta t$ で近似することができる。密度についても同様に考えることができ、ある時刻 t_1 で、密度が ρ_1 だったとすると、時刻 $(t_1 + \Delta t)$ までの密度は十分小さい Δt に対して ρ_1 で近似することができる。これより、時間 Δt の間に観測者の前を通過する車の数は $\rho_1 v_1 \Delta t$ と表すことができる。したがって、単位時間あたりの交通量は

$$q = \rho_1 v_1 \tag{2.6}$$

となる。 3 つの変数は、各々、位置 x、時間 t に依存しているので、以上をまとめると

$$q(x,t) = \rho(x,t) v(x,t) \tag{2.7}$$

と表すことができる。

2.3 車の数の保存

Fig. 2.2 のようなある道路上の区間 $x = [a,b]$ における車の数 N は、密度の積分、すなわち

$$N = \int_a^b \rho(x,t) dx \tag{2.8}$$

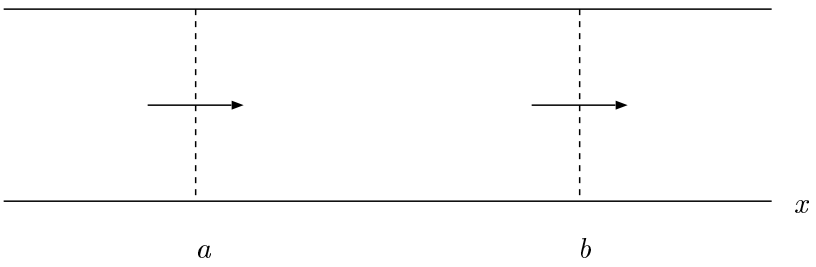

Fig. 2.2 車の出入り

である。ただし、この区間内での車の出入りはないものとする。このとき、車の数の変化は $x = a, x = b$ を横切った車の数のみで決まる。境界を横切る車の数が時間に関して一定でないならば、車の数の変化率 dN/dt は、単位時間に $x = a$ を右に横切る車の数から $x = b$ を右に横切る車の数を引いたものに等しい。単位時間あたりの車の数は交通量 $q(x, t)$ に等しいので、

$$\frac{dN}{dt} = q(a, t) - q(b, t) \tag{2.9}$$

となる。式 (2.8) , 式 (2.9) より、

$$\frac{d}{dt}\int_a^b \rho(x, t)dx = q(a, t) - q(b, t) \tag{2.10}$$

を得る。この式を積分保存則という。

積分保存則は、道路の各点で成り立つ局所的保存則として表現される。道路の端点 $x = a, x = b$ はそれぞれ任意の独立変数と考える。式 (2.10) は $x = a, x = b$ が時間において固定されていると仮定した上で得られたものであるので、偏導関数に置き換える必要がある。

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_a^b \rho(x, t)dx = q(a, t) - q(b, t) \tag{2.11}$$

これを b について偏微分すると

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho(b, t) = -\frac{\partial}{\partial b}q(b, t) \tag{2.12}$$

となる。b は任意の位置を示すので x に置き換える。式 (2.7) を用いて整理すると、

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v) = 0 \tag{2.13}$$

となり、車の保存は密度と速度場に関する偏微分方程式として書き表される。

2.4 速度と密度の関係

車の密度と車の速度の 2 つの変数は、ただ 1 つの方程式 (2.13) により関係づけられている。速度場が既知であれば、式 (2.13) は未知の交通密度に対する偏微分方程式になる。この場合にもし初期交通密度が既知であれば、未来の交通密度を予測するのに式 (2.13) を用いることができる。しかし実際は速度場は未知のものであるので、これを調べなければならない。車の運動を規定するのは動力ではなくドライバーの意志・決定によってである。どんな因子が個々の車に影響を及ぼすのかを考える必要がある。

交通が十分まばらであれば、各車のドライバーはある制限 (速度制限や技術的な制限など) 内で自分の思うままに動くことができる。交通が増加してくると他の車との遭遇、特に低速車との遭遇はより多くなってくるだろう。それでも低速車を追い越すことができるのでドライバーの平均速度はそれほど小さくはない。しかし、さらに交通の激しいところになると、車線変更などが非常に難しくなり、それにより交通流の平均速度は落ちてくる。これらの観測を基に、Lighthill と Whitham が、またそれとは独立に Richards が、道路の任意の点で車の速度は車の密度のみに依存する、として、

$$v = v(\rho) \tag{2.14}$$

という交通流の数学的モデルを提唱した。(R.Harberman[1] 参照)

道路上に他の車がいなければ、その車は最大速度 v_{max} で走行することができる。しかし密度が増してくると、他の車の存在が自分の車の速度を落とすことにつながる。さらに密度が増すにつれ車の速度は減少し続ける。

$$\frac{\partial v}{\partial \rho} = v'(\rho) \leq 0 \tag{2.15}$$

そして、最大密度 ρ_{max} に達すると車は停止してしまう。

$$v(\rho_{max}) = 0 \tag{2.16}$$

Fig. 2.3 は、速度と密度の 2 つの関係を表したものである。車の速度は交通密度の増加に従って減少する、すなわち $v'(\rho) \leq 0$ である。

2.5 交通量と密度の関係

交通量は (密度) × (速度) であるから、前節のモデルでは、交通量もまた密度にのみ依存している。

$$q = \rho v(\rho) \tag{2.17}$$

交通量は、次の 2 つの場合に 0 となる。

1. 交通がない場合 ($\rho = 0$)
2. 交通が動かない場合 ($v = 0$ つまり $\rho = \rho_{max}$)

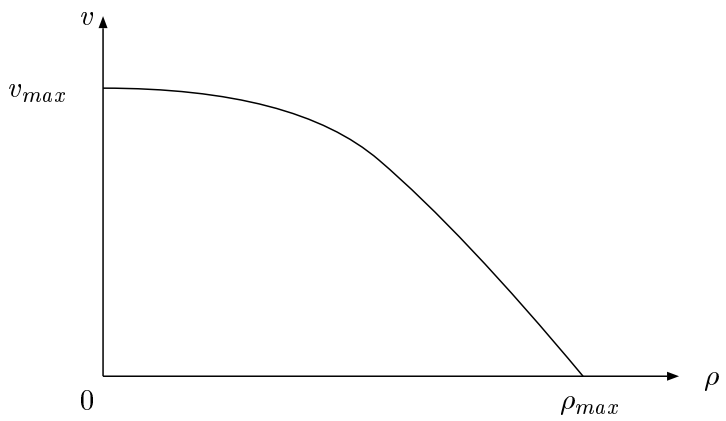

Fig. 2.3 速度と密度の関係

密度のその他の値 $(0 < \rho < \rho_{max})$ に対しては、交通量は正でなければならない。したがって一般に交通量の密度への依存は Fig. 2.4 に示されたようになる。交通量は極大で最大となる。

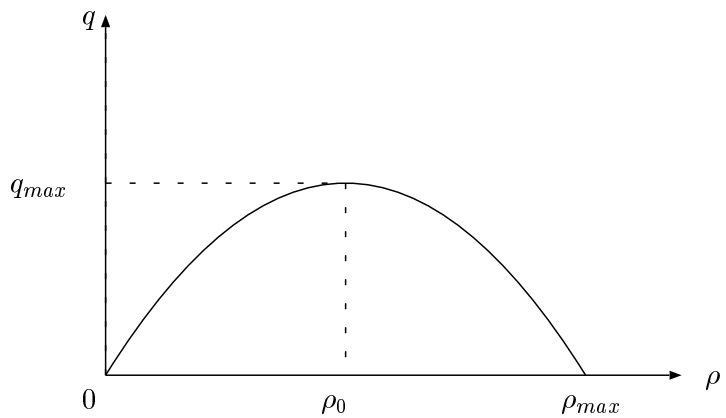

Fig. 2.4 交通量と密度の関係 (基本図)

交通量と密度の関係は基本図と呼ばれ、交通流では頻繁に登場する。もし交通流が定常的であれば、$q = \rho v$ となる。この式と $\rho - v$ 曲線が減少関数であることから、基本図 ($\rho - q$ 図) を作成すると、交通量が最大になる密度 ρ_0 が存在する。ρ_0 より低密度側を自由流領域、高密度側を渋滞流領域と呼ぶ。

3　セルオートマトンモデル

3.1　セルオートマトンモデルとは

セルオートマトンモデルは、文字通り、道路を 1 つ 1 つのセルに分けて、そのセルに車がいるかいないかを決め、その後の車の挙動を調べることで、実際の交通をモデル化しようというものである。

まずモデルについて簡単に説明する。セルオートマトンは時間の発展 (アップデイト) の規則を設定することによっていくつものモデルを構成することができる。例として Wolfram が “ セルオートマトンモデル 184 ” と分類したものを紹介し、以降、このモデルを用いて交通流を考えていくこととする。

このモデルは次の規則により構築される。(Fig. 3.1)

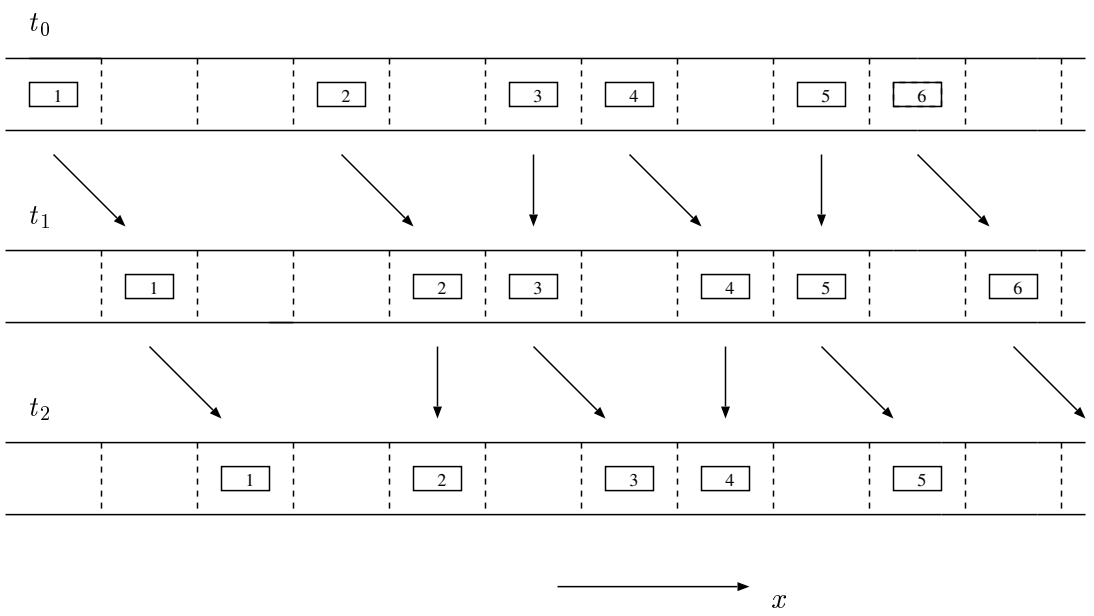

Fig. 3.1　1 次元セルオートマトンモデル

N 個のセルからなる 1 次元の格子を道路上において考える。車はセルのいずれかに位置し、x 軸の正方向に走るとする。

まず、格子上に n 個の車を適当におく。このときの時刻を t_0 とする。時刻 t_0 のときに各車の 1 つ前のセルに他の車がいなければ、その車は次の時刻 t_1 で 1 セル分だけ前に進み、t_0 のときに 1 つ前のセルに他の車がいれば、t_1 ではその車は動かない、とする。これを非対称排除モデルという。この規則を全ての車に対して同時に適用し車を移動させる。これをパラレルアップデイトという。これを繰り返すことで、次の時刻、その次の時刻、と順に進めていくことが出来る。

しかし、アップデイトを行う上で、N 個のセルの一番左端と一番右端の部分に問題がで

てくる。仮に、一番左のセルから順に 1 番目のセル、 2 番目のセル、と番号をつけ、一番右端のセルを N 番目のセル、とする。もしアップデイトを行う前の状態で N 番目のセルに車がいた場合、その前のセルが存在しないために、この N 番目のセルにいる車は、次の時刻ではどう動いたらいいのかわからない。また、アップデイトを 10 回、 20 回と繰り返していくと、車がびっしりつまっていたとき以外は、時刻 t_0 で 1 番目のセルにいた車でも、ある程度は右に移動しているはずである。しかし、時刻 t_0 のときに 1 番目のセルにいた車よりも左には車はいないので、時間が進むにつれ、この N 個のセルの左側から徐々にガラガラの状態になっていってしまう。そのために、 1 番目のセルと N 番目のセルにおいて、その外側からの車の出入りのルールを考える必要があるため、境界を考える。この境界の条件としては例えば開放境界と周期境界の 2 つが考えられる。(Fig. 3.2 参照)

開放境界は入口と出口がそれぞれ決められているので、N 番目のセルにいる車は、いつでもこの格子から抜けていくことができる。また、 1 番目のセルに車がいない限りは、車は 1 番目のセルからいつでもこの格子の中に入ってくることができる。

周期境界は入口と出口が連結しているもので、この場合、N 番目のセルの次には 1 番目のセルがある、すなわち右と左がつながったものと考える。そうすると、もし N 番目のセルに車がいて、 1 番目のセルに車がいなかった場合、N 番目のセルにいる車は、次の時刻で 1 番目のセルに移動する、ということになる。そう考えると、周期境界条件での 1 次元格子はリング状の格子と見ることもできる。

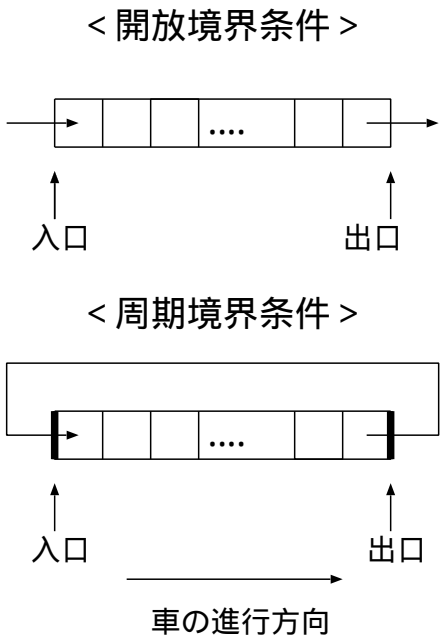

Fig. 3.2 開放境界と周期境界

3.2 セルオートマトンモデルにおける基本量の定義

前章で交通流の流体モデルでの基本量の定義について述べたが、セルオートマトンモデルを考える場合、このモデルは粒子モデルであるので、これらの定義は難しいものになる。以下ではセルオートマトンモデルにおける基本量について考えていく。

3.2.1 3 つの基本量

- 密度

  通常、交通密度は単位長さ当たりの車の台数で定義される。しかし、混んでいるところ、空いているところをくわしく見ていきたい場合、狭い領域での密度を得る必要がある。流体モデルの場合を考えてみる。$N(x)$ を位置 0 から x までの車の台数とする。

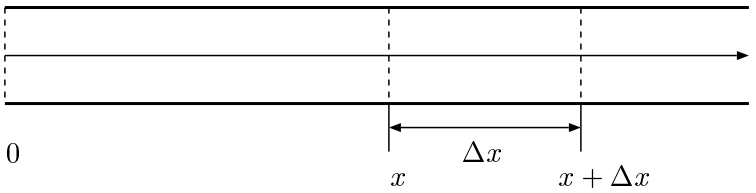

Fig. 3.3 位置 x における交通密度

Fig. 3.3 において、位置 x での交通密度 $\rho(x)$ は、x と $x+\Delta x$ の間に存在する車の台数 $N(x+\Delta x)-N(x)$ について、位置 Δx を限りなく 0 に近づけたものと考えればよいので、

$$\rho(x)=\lim_{\Delta x\to 0}\frac{N(x+\Delta x)-N(x)}{\Delta x} \tag{3.1}$$

となる。これにより、各点 x での密度というものが定義できる。

一方、セルオートマトンモデルは、格子という考え方でモデル化されているため、幅を狭く考えると、最終的に 1 つのセルに着目することになる。そうすると密度は、そのセルに車がいるかいないかのみで決まり、数値として 0 か 1 のどちらかしかとれなくなってしまい、意味のないものとなってしまう。かといって幅を広げると混んでいるか空いているかが判断できなくなる。M 個のセルからなる格子の中で、「i 番目のセルでの密度」というものが定義できるかどうかが大きな問題となる。ゆえに、i 番目付近での密度、というものを考えるべきであろう。

- 速度

  セルオートマトンモデルでは、時間の流れを「次のステップ」と考えていくため、流体モデルの考え方とは異なっていて、車の移動距離 $y(t)$ の時刻 t に関する微分

  $$v(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{y(t + \Delta t) - y(t)}{\Delta t} \tag{3.2}$$

  によって速度を決定することはできず、 1 ステップの間に移動した量 (整数) で決まることになるが、このモデルでは、速度は 0 か 1 の 2 つの値しかとらない。しかしこの速度は、例えば x_1 から x_2 までの区間、というように x 軸方向に幅をもって、その区間内にいる車の平均速度を考えるとすればそれ以外の値を持たせることは可能である。また、同じように t 軸方向に幅をもつ、例えば時刻 t_1 から t_2 までの時間幅をとり、その中で車がどれだけ動いたかを見ることにより、平均の速度を求めることもできる。

- 交通量

  交通量は通常、単位時間あたりにある点を通過する車の台数で与えられ、各点において定義される。時間を 1 ステップ単位で考えるとすると、その点を車が通過すれば 1 、通過しなければ 0 の 2 つの値しかとらない。しかし、これも区間で考え、例えば x_1 から x_2 までの区間、というように x 軸方向に幅をもって、その区間内のすべてのセルでの交通量の平均として与えれば、平均交通量を考えることができる。また、速度と同じように、t 軸方向に幅をもって、時刻 t_1 から t_2 までの時間幅をとり、あるセルにおいて何台の車が通過したかを調べることで、そのセルでの平均交通量を求めることもできる。

Fig. 3.4 セルオートマトンモデル例

Fig. 3.4 の例をもとに考える。上の図は、セル数 40 の格子に車 18 台をランダムに配置したものである。t_0 が初期状態で、図中の黒くなっている部分に車がいるものとしている。次のステップ t_1 で動くことができた車は 11 台であった。このセル数 40 の区間内での平均密度、平均速度、平均交通量を考えてみる。

平均密度は、セル数 40 に対して車 18 台であるから、$18/40$ と求められる。次に平均速度は、全部の車 18 台に対して動いた車が 11 台である。動いた車の速度はすべて 1 であるから、$(1 \times 11 + 0 \times (18 - 11))/18 = 11/18$ となる。最後に平均交通量は、セル数 40 に対して交通量 1 のセルが 11 あるので、 $11/40$ と求められる。

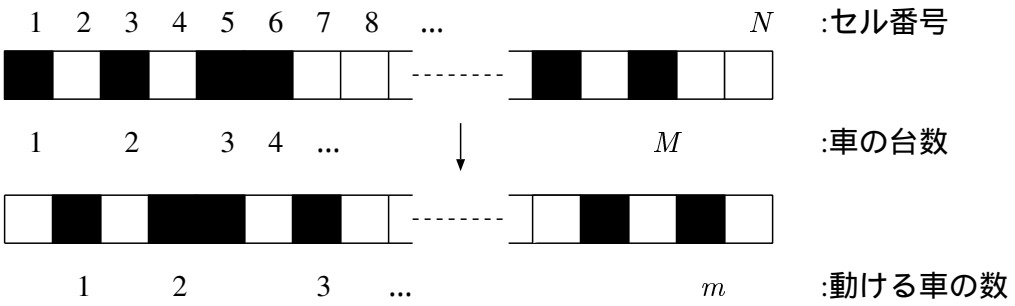

Fig. 3.5 セルオートマトンモデル例 (2)

一般に、N 個のセルからなる区間内に M 台の車がいるとする (Fig. 3.5)。そのうち次のステップにおいてひとつ前に動ける車が m 台あるとすると、

$$\text{平均密度} : \bar{\rho} = \frac{M}{N} \tag{3.3}$$

$$\text{平均速度} : \bar{v} = \frac{m}{M} \tag{3.4}$$

$$\text{平均交通量} : \bar{q} = \frac{m}{N} \tag{3.5}$$

となるので、確かに $\bar{q} = \bar{\rho}\bar{v}$ が成り立っている。

しかし、$\bar{q}$ は車の配置の状態によっては m の値が変わってきてしまうため (Fig. 3.6)、$\bar{\rho}$ だけでは決まらなくなる。そうすると $\bar{q} = \bar{q}(\bar{\rho})$ とはいえなくなる。

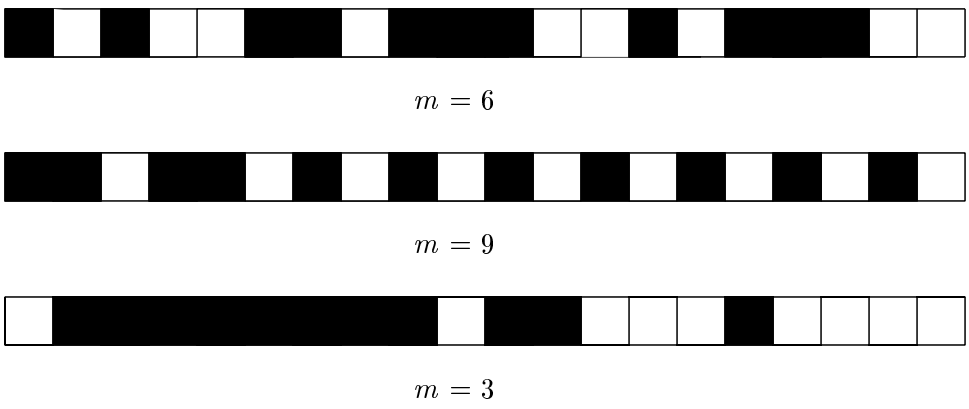

Fig. 3.6 車の配置による交通量の変化

また、区間ではなく、一点での値を考えたときも交通量は密度のみでは決まらないことになる。(Fig. 3.7)

セル番号 i : 1 2 3 4 5 6 7

i	1	2	3	4	5	6	7
密度	1	1	1	0	0	1	0
速度	0	0	1	0	0	1	0
交通量	0	0	1	0	0	1	0

Fig. 3.7 一点での値

「速度および交通量は密度のみに依存する」ということが、セルオートマトンモデルにおいてもいえるのかどうか、いえるとすれば 3 つの基本量の定義はどうなるのかを考える必要があると思う。

3.2.2 進行波解

「速度および交通量が密度にのみ依存する」という状況を与えてくれるモデルとして、進行波というものがある。進行波とは波動方程式における用語で、形を変えずに移動する波をいう。波動方程式では、

$$u = f(x - ct) \tag{3.6}$$

の形の解がそれである。ここで、c は定数であり移動速度を表す。

周期境界条件でのセルオートマトンモデルにおける進行波を考えてみる。ここで用いる変数は前項と同じものとし、用語として、

- 渋滞列 : 2 台以上の車が並んで配置されている状態
- 空白列 : 車のいないセルが 2 つ以上つながった列

とする。

ルール 184 のモデルでは、車の流れは短時間のうちに進行波 (形の変わらない波) の流れになる。周期境界条件においては、長さ N の同じ状態が無限に繰り返されていると考えると、全体としての平均密度は長さ N の区間での密度に等しいとみることができる。進行波は形が変わらずに常に一定の動きであるので、平均密度、平均速度、平均交通量、の 3 つの値は不変のものである。ここでは長さ N の区間でのこれら 3 つの値を考える。

渋滞の先頭はルール 184 ではひとつ前へ動き、残りの部分は止まったままなので、周期境界条件の場合、渋滞列の一番前は空白なので、先頭の車は必ずその列から外れる。また、渋滞の最後尾に一度に 2 台以上の車がつながることはない。このことから渋滞列は、短くなることはあっても長くなることはない。(Fig. 3.8)

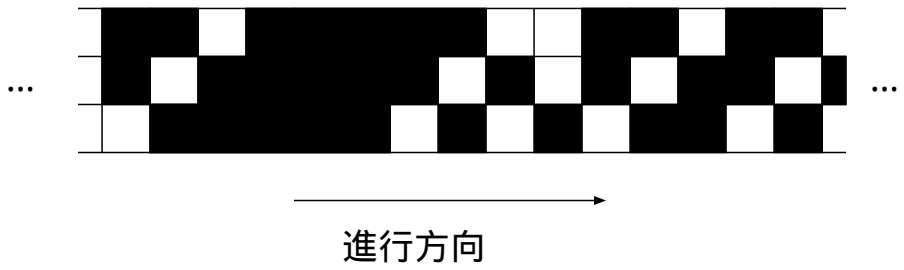

Fig. 3.8 渋滞列

また、複数の空白列がこの進行波に存在する場合、進行波は形は変わらずに移動するだけなので、渋滞列の数は不変である。渋滞は長くなることはないので、いずれかの渋滞列が短くなると、それを補うようにひとつ長いものが短くならないといけないが、一番長いものを補うことはできないため、それは破綻する。

例を挙げて説明する。今、進行波の中に長さ 2 の渋滞列が a_2 個、長さ 3 の渋滞列が a_3 個、長さ 4 の渋滞列が a_4 個、 …… 長さ l の渋滞列が a_l 個あるとする。l が最長である。進行波は形は変わらずに移動するのでこの渋滞列の数は不変である。前述から、渋滞列は長くなることはないので、もしこの進行波の中のいずれかの渋滞列が短くなった場合、例えば長さ 4 の渋滞列が 1 つ短くなり長さ 3 になったとき、これを補うようにひとつ長いもの、長さ 5 の渋滞列が長さ 4 にならなければならない。そうすると長さ 5 の渋滞列がひとつ減るので、またそれを補うように長さ 6 の渋滞列がひとつ短くなる、それをまた補うように長さ 7 の渋滞列が、というように、ひとつ長いものが短くなることで補っていくことになるが、長さ l の渋滞列が 1 つ短くなると、この渋滞列は最長なので、補うことができなくなる。よって渋滞列は短くなることはできない。渋滞列の先頭はひとつずつ抜けていくので、後ろからひとつずつ補われて長さが保持されることになる。これにより渋滞列はひとつずつ左へ移動する。

このことから、渋滞列の最後尾には常にひとつずつ車が加わる必要がある。そのためには、渋滞列の後ろには空白はひとつだけの状態でなければならず、次の渋滞列までに空白列があってはならない。これはすべての渋滞列においていえるので、渋滞列を持つ進行波は空白列を持ち得ないことがわかる。またこのときは

$$M > \frac{N}{2} \tag{3.7}$$

となっていることは容易にわかる。

空白列を持つ進行波の場合は、それが渋滞列を持つとすれば、それは空白列を持たないことになるため、空白列を持つ場合は渋滞列を持たないといえる。またこのときは

$$M < \frac{N}{2} \tag{3.8}$$

となっていることも容易にわかる。最後に、

$$M = \frac{N}{2} \tag{3.9}$$

の場合は、前述からわかるように、進行波は渋滞列と空白列を同時に持つことができないため、この場合では空白列があれば式 (3.9) より必ず渋滞があることになるので矛盾が生じ、またその逆も同じなので、空白列と渋滞列のどちらも持たず、車は一台おきの配置になる。これらのことをまとめると次のようになる。

$$M > \frac{N}{2} \text{ のとき、必ず渋滞列が存在するため、空白列を持たない。} \tag{3.10}$$

$$M < \frac{N}{2} \text{ のとき、必ず空白列が存在するため、渋滞列を持たない。} \tag{3.11}$$

$$M = \frac{N}{2} \text{ のとき、渋滞列も空白列も持たない。(ひとつおきの配置)} \tag{3.12}$$

これら 3 つのそれぞれの場合の m を計算する。
式 (3.10) の場合、空白は $N - M$ 個あり、それらは 2 つ以上並ぶことはない。よって

$$m = N - M \tag{3.13}$$

となる。式 (3.11) の場合、車はバラバラで、 2 台以上並んでいない。よって

$$m = M \tag{3.14}$$

となる。式 (3.12) の場合、明らかに

$$m = M \tag{3.15}$$

となる。これらを考えると、

$$\bar{v} = \frac{m}{M} = \begin{cases} \dfrac{M}{M} = 1 & (\bar{\rho} \leq \frac{1}{2}) \\ \dfrac{N-M}{M} = \dfrac{N}{M} - 1 = \dfrac{1}{\bar{\rho}} - 1 & (\bar{\rho} > \frac{1}{2}) \end{cases} \tag{3.16}$$

$$\bar{q} = \frac{m}{N} = \begin{cases} \dfrac{M}{N} = \bar{\rho} & (\bar{\rho} \leq \frac{1}{2}) \\ \dfrac{N-M}{N} = 1 - \dfrac{M}{N} = 1 - \bar{\rho} & (\bar{\rho} > \frac{1}{2}) \end{cases} \tag{3.17}$$

が導かれる。よってこの進行波に対しては、$\bar{v}, \bar{q}$ は $\bar{\rho}$ のみの関数、となる。これらから基本図を作成すると Fig. 3.9 のように書き表される。

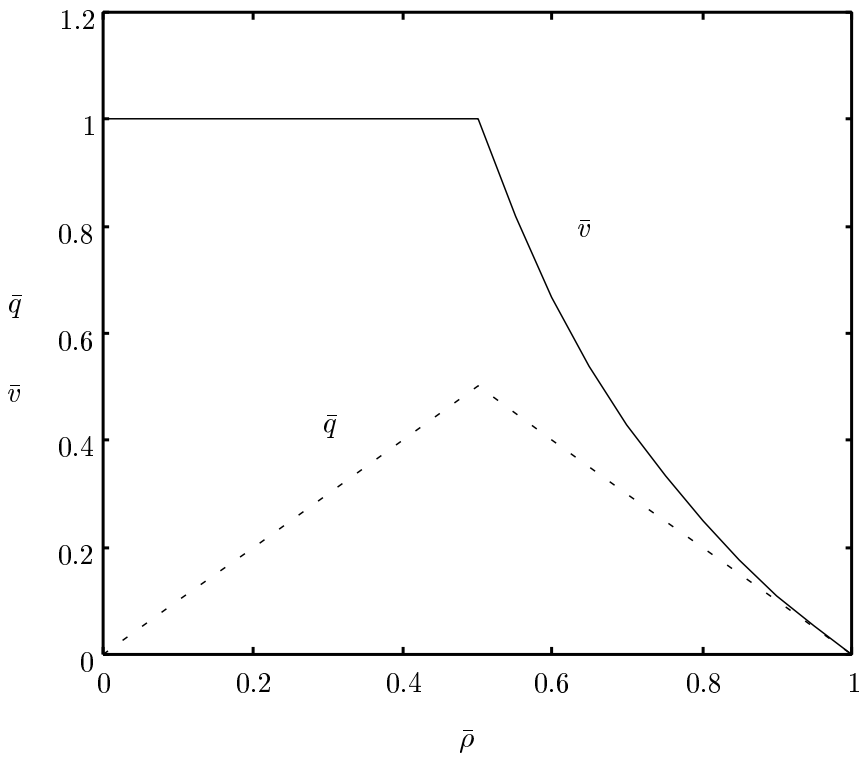

Fig. 3.9 セルオートマトンモデルの基本図

3.3 モデル 184 のシミュレーション例

3.1 節で述べた規則に基づき、実際にシミュレーションを行ってみた。セル数 x、ステップ数 t ともに 100 とした。車はすべて x の正方向に走り、一番上の 1 行目を初期状態 (0 ステップ目) とし、t の正方向に向かって時間が経過していくものとする。黒い点が車、白い点が空きスペースを示す。車の台数および配置はランダムに指定した。

以下にモデル 184 の規則を簡単にまとめておく。

1. 車 C が存在するセルの 1 つ前のセルに他の車がいなければ、車 C は次のステップで 1 つ前に移動する。
2. 車 C が存在するセルの 1 つ前のセルに他の車がいれば、車 C は次のステップでは動かない。
3. 全ての車に対して、 1. , 2. の規則を同時に適用する。

3.3.1 開放境界条件

開放境界条件下でのシミュレーション結果を示す (Fig. 3.10)。開放境界条件では、着目している位置よりも前のセル、または後ろのセルの状態を考慮にいれる必要がある。ここでは、左から車が出てくる確率を p_1、右から車が出ていく確率を p_2 として計算したものである。平均密度は上から順に 0.16 , 0.61 , 0.88 であり、左右ともに同じ初期値を使用している。

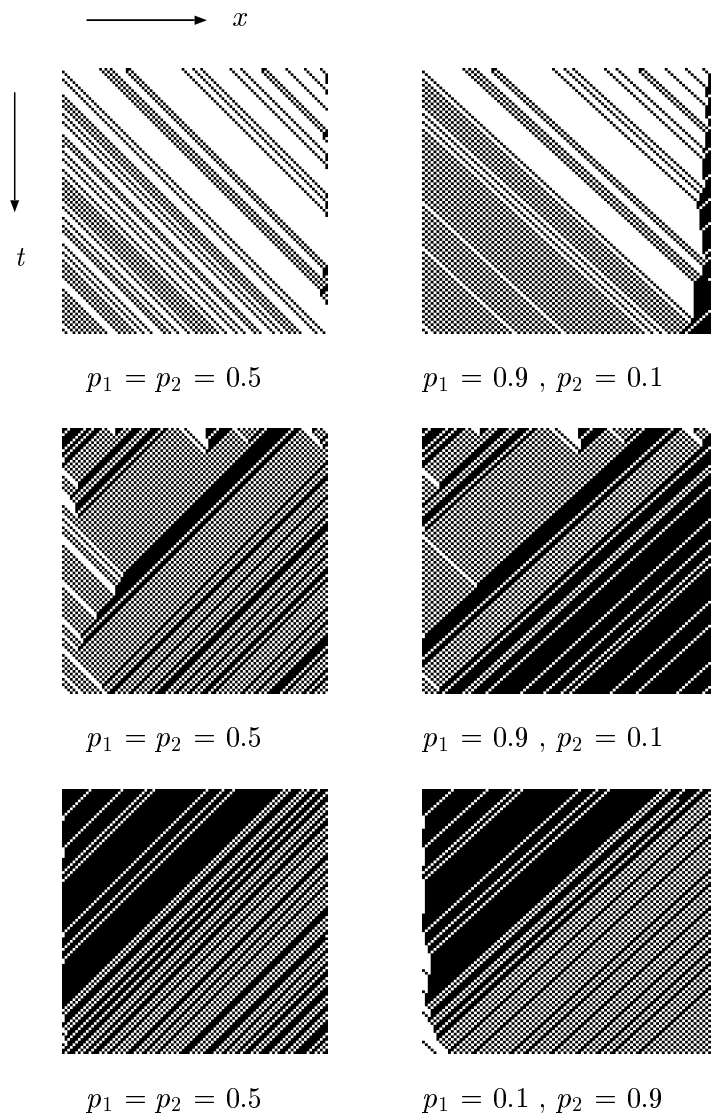

Fig. 3.10 モデル 184 シミュレーション例 (開放境界条件)

この条件下では、p_1、p_2 の確率により、結果が大きく異なってくることがわかる。

3.3.2 周期境界条件

周期境界条件下での例である。平均密度は DATA(1) 0.53 , DATA(2) 0.82 , DATA(3) 0.27 , DATA(4) 0.5 である。

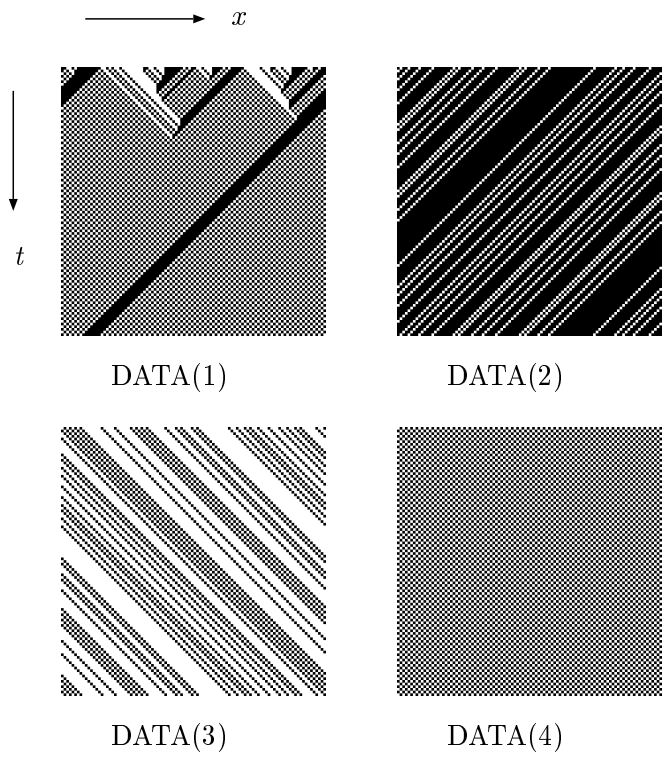

Fig. 3.11 セルオートマトンモデル 184

渋滞列と空白列が同時に存在している場合、 30 ステップ目前後のあたりまで列の形が変わっているのが分かる。その後は、形は変わらずに進んでいる。(DATA(1))

渋滞列のみの場合は、形は変わらずに進み、渋滞列が後方に移動していく様子がよくうかがえる。(DATA(2))

空白列のみの場合も、形は変わらずに進んでいる。空白列は前方に移動していく様子がうかがえる。(DATA(3))

ひとつおきの配置の場合も形は変わらず、車がスムーズに 1 つずつ移動している様子がうかがえる。(DATA(4))

周期境界条件において、このモデルに基づくシミュレーションをまとめると次のことがいえる。渋滞領域は車の進行方向と反対の方向に伝播する。渋滞は、全体のセル数 C に対して車の存在するセルが $C/2$ 個以上あった場合、すなわち車の密度が 0.5 を越えたときに発生し、いったん発生すると形は崩れずに安定である。セルオートマトンモデルでは、

密度 0.5 という値は特別であり、全体のセル数 C に対して、車の存在するセルが $C/2$ 個あった場合、渋滞の緩和が終った後は、必ず車が 1 台おきに並んでいる状態になる。これはこのモデルの重要な特徴であり、自己組織化とよばれる。この状態にあと 1 台でも車が入ると、 1 台おきに並んでいる自己組織化が壊れ、必ず止まってしまう車ができてしまうため、進行波の中に渋滞列が存在することになる。(Fig. 3.12 参照)

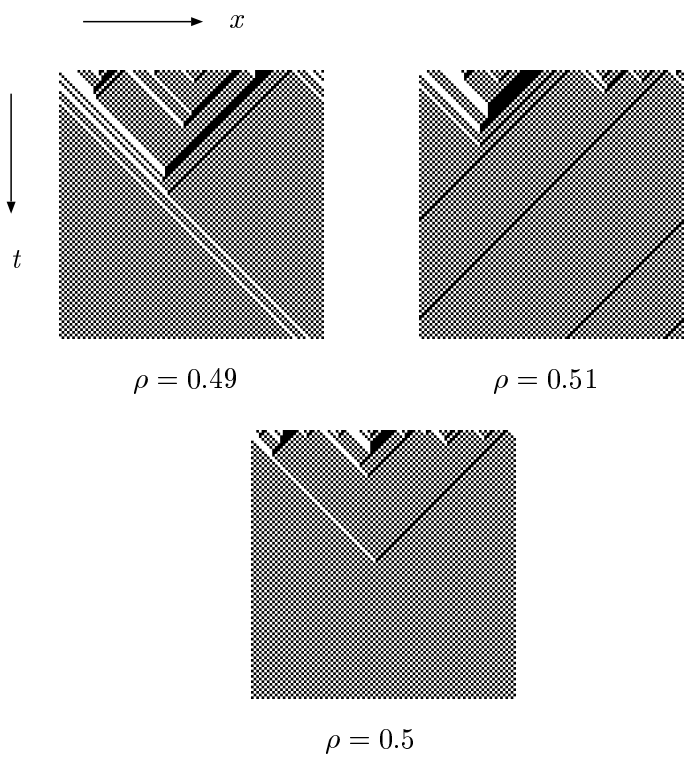

Fig. 3.12 密度 0.5 付近でのシミュレーション例

このように、セルオートマトンモデルでは、臨界密度 ($\rho = 0.5$) で自由流 (渋滞のないスムーズな流れ) から混雑流 (渋滞が起きている混雑した流れ) へと移り変わる。このような渋滞は特別な外因なしで起こるものなので、自然渋滞に対応する。

3.3.3 事故渋滞について

自然渋滞に対して、交通事故などによる渋滞はモデルを変形することによって発生させることができる。道路上で交通事故が発生した場合を考える。当然、車はその場所を通過しにくくなる。そこで、 1 次元格子上のあるセル i で車が通過しにくくなるように、通過確率 p_i を導入する。つまり、セル i においては通過確率 p_i で車が通過し、$1 - p_i$ でストップするものとする。その他のセルでのアップデイトはモデル 184 と同じものとする。

このモデルによるシミュレーション結果を Fig. 3.13 に示す。事故は左から 50 番目の

セルで起こったものとし、通過確率は 0.4 とした。平均密度は左から順に 0.19 , 0.39 , 0.8 である。

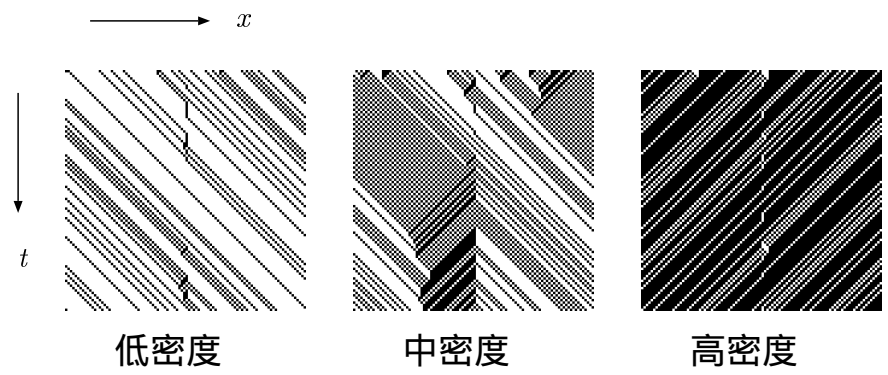

Fig. 3.13 事故渋滞シミュレーション例 $(p_i = 0.4)$

この結果から考察する。事故現場で通過できずに数ステップの間止まったままの車がいるが、低密度では、車の密度が低いため、事故現場付近で局所的な渋滞は起こっているものの、全体の交通流に対してはほとんど影響を及ぼしていないことがわかる。これは低密度では事故は交通流自体に影響を及ぼさないことを意味する。また、高密度でも事故のない場合と同じであり、影響を及ぼさない。これは、密度が高いため、自然渋滞の影響が事故渋滞よりも強いためである。事故の現場付近では、局所的な事故渋滞は発生しているが、系全体には影響しない。

しかし、中密度領域では事故による交通渋滞が発生し、系全体に大きな影響を与える。通過確率が低くなれば、前が空いていても次ステップでそのまま同じ場所に止まる確率が高い、ということなので、後続車への影響は大きくなる。とすれば、低密度でも、また高密度でも影響が出てくるのではないかと推測される。逆に通過確率が高くなれば、系全体への影響が少なくなることもいえる。よって、中密度でもあまり影響が出ないのではないか、とも考えられる。

自然渋滞は、車が多いから起こってしまう渋滞であるが、事故渋滞は車がある位置で止まってしまうことにより起こる渋滞である。また、事故渋滞は中密度領域で非常に大きな影響があることから、交通量にも影響が出てくる。実際、Fig. 3.13 の中密度領域では、65 ステップ目以降で、かなり長い渋滞が起きている。66 ステップ目から 100 ステップ目までの、 51 番目のセルでの交通量は、 35 ステップに対し、通過台数はわずか 8 台である。この例では車は 39 台存在しているので、 100 ステップすべてを通してみても、 51 番目のセルを通過した台数は 29 台である。 10 台の車が事故渋滞によりここを通過していないことになる。

自然渋滞と事故渋滞は、先に述べたように原因が全く異なるものであり、それによる結果も大きく異なると思われる。このシミュレーションでは、中密度での結果に大きく違いが表れたようである。

4　セルオートマトンモデルの改良

前章まで、セルオートマトンモデル 184 について述べてきた。しかしこのモデルはあまりにも単純であり、実際の交通流とはかなりかけ離れている。これを改良した K.Nagel と M.Schreckenberg の、加速や減速の過程を考慮したルールは、交通流の古典的な模型として有名である。

4.1　K.Nagel , M.Schreckenberg モデル

4.1.1　モデルのルール

K.Nagel と M.Schreckenberg のモデルでは、車の速度を 0 から v_{max} までの整数として考え、セルオートマトンモデルのアップデイトは 4 つの規則によって行われるとしている。湯川 [3] には、この規則が次のように書かれている。

加速 もし車の速度 v が最大速度 v_{max} より小さかったら、かつ今の速度 v で進む距離に 1 格子点分を加えた距離に他の車がいなかったら、速度を $(v+1)$ にする。

減速 車が格子点 i にいてその前の車が格子点 $(i+j)$ にいるとき、もし $j \leq v$ なら格子点 i にいる車の速度を $(j-1)$ にする。

ランダムブレーキ 確率 p で車の速度が 0 でないとき速度を 1 小さくする。

車の運動 速度 v の車はその位置を v 進める。

また、長谷 [4] には次のように書かれている。

1. 車両速度 v が v_{max} より低いとき、速度は 1 だけ増加させる (加速)。
2. 車間距離 Δx が v 以下のとき、速度は $(\Delta x - 1)$ に減速される (減速)。
3. 車が停止していないとき、確率 p で速度を 1 だけ減速する (ランダム化)。
4. 車は v サイト進む (前進)。

また、坂東 [5] には次のように書かれている。

速度 v の車は 1 ステップで v サイトだけ進むが、加速のルールが、

1. 車が最高速度より低くかつ前方サイトが空いていれば 1 だけ加速する
2. 車間距離がその現在の車の速度以下のときは 1 だけ減速する
3. 車の速度がゼロでないとき確率 p で 1 だけ減速する

と決められている。

以上、 3 つの参考文献から K.Nagel と M.Schreckenberg のルールを挙げてみた。文献により記述が様々である。しかし、どの文献においても、実際に車が進むことと、確率 p

による減速の 2 つが、いつ行なわれるのかについては曖昧であり、はっきりと記述されていない。湯川 [3] でいえば、 3 番目の「ランダムブレーキ」と、 4 番目の「車の運動」である。

まず「ランダムブレーキ」であるが、この文献には「車の速度が 0 でないとき」と書かれている。これをどう捉えるかによってルールが変わってくる。例えば、アップデイトが行われる前の車の速度 v_1 が 0 であったとき、その車のひとつ前のセルが空いていれば、加速のルールにより速度が 0 から 1 に更新されるわけであるが、「車の速度が 0 でないとき」というのが更新される前の速度 v_1 に対してなのか、更新されたあとの速度に対してなのか、ということである。更新される前の速度に適用するのであれば、この 0 から 1 に速度が更新された車は、更新前が 0 だったので、確率 p は適用されず、次のステップで 1 セル進むことになる。もし、更新された後の車に適用されるとすれば、車の速度 v_1 が 0 から 1 に更新された車にも確率による減速が適用され、確率 p にあてはまれば、この車の速度はまた 0 になり、次のステップでは動かない、ということになる。そうするとルールは全く違うものとなってしまう。

「車の運動」についても同様で、次のステップは更新後の速度で進むのか、それとも更新前の速度で進んでから速度が更新されるのか、というのが文献からでは分からない。

これらを考えた上で、「ランダムブレーキ」と「車の運動」を明確にするため、次の 2 つのルールに書き直してみる。

車 C の速度を v_1 とする。

1. 車 C の速度が v_{max} より小さく $(v_1 < v_{max})$、かつ、前方 $(v_1 + 1)$ までの距離に車がいなかったら、車 C の速度を 1 だけ上げる。$(v_2 = v_1 + 1)$
2. 車 C が点 i にいて、その前の車が点 $(i + j)$ にいるとき、$j \leq v_1$ なら点 i にいる車の速度を $(j - 1)$ にする。$(v_2 = j - 1)$
3. 車が停止していないとき $(v_1 \neq 0)$、確率 p で 1 だけ減速する。$(v_3 = v_2 - 1)$
4. 次のステップで車を v_3 セル進める。3. の規則に当てはまらなかった車は v_2 セル進める。

これは、更新される前の車の状態に対して、確率による減速のルールを適用したものである。以下ではこれをルール (A) とする。

また、更新後の車にも確率による減速を適用したものは次のようになる。

車 C の速度を v_1 とする。

1. 車 C の速度が v_{max} より小さく $(v_1 < v_{max})$、かつ、前方 $(v_1 + 1)$ までの距離に車がいなかったら、車 C の速度を 1 だけ上げる。$(v_2 = v_1 + 1)$
2. 車 C が点 i にいて、その前の車が点 $(i + j)$ にいるとき、$j \leq v_1$ なら点 i にいる車の速度を $(j - 1)$ にする。$(v_2 = j - 1)$
3. 1. , 2. に当てはまらなかった場合は、$(v_2 = v_1)$ とする。

4. 車が停止していないとき ($v_2 \neq 0$)、確率 p で 1 だけ減速する。($v_3 = v_2 - 1$)
5. 次のステップで車を v_3 セル進める。4. の規則に当てはまらなかった車は v_2 セル進める。

これを以下ではルール (B) とする。

まずルール (A) であるが、 1. と 2. は並列に行なわれる。

1. のルールは、前が空いているなら加速する、ということである。ただし加速は徐々に、ということで 1 ずつになっている。この 1. に当てはまるものはそのまま 1. の規則に従って更新を行う。当てはまらないものは 2. の規則に当てはめる。

2. のルールは自分の前の車が近いところにいたら、前の車にぶつからないように速度を落とす、ということである。ぶつからないように、ということなので、急ブレーキも可能ということになる。この 2. に当てはまればそのまま 2. の規則に従い更新を行う。そして、 1. もしくは 2. で更新が行なわれた車はすべて 3. に当てはめる。v_1 が 0 だったものは、ここには当てはまらずそのまま 4. へ進み、v_1 が 0 でなかったものに対しては、確率 p による減速を適用し、4. へ進む。

1. と 2. のどちらの条件にも当てはまらなかった場合は、速度が 0 でないものについては確率 p が適用され 4. へ進み、速度が 0 であるものは確率 p が適用されずそのまま 4. へ進む。これで計算が完了となり、次のステップでは更新された速度分だけ車を進める。

ルール (B) も、流れはルール (A) と同じで、 1. もしくは 2. に当てはまった車は、そこで更新が行なわれ、その後 4. に当てはめる。1. と 2. に当てはまらなかった車も、3. により ($v_2 = v_1$) として全て 4. に当てはめる。そこで v_2 が 0 であれば、確率 p が適用されずそのまま 5. へ進み、v_2 が 0 でなければ確率 p を適用し 5. へ進む。これで完了となり、同じように更新された速度分だけ次のステップで進める。

4.1.2 シミュレーション例

前項の規則に基づきシミュレーションを行ってみた結果を示す。左側はルール (A) を適用したもの、右側はルール (B) を適用したものである。境界条件は周期境界条件、ステップ数とセル数ともに 100 とし、初期速度はランダムに指定したが、左右ともに初期状態 (0 ステップ目) は同じである。v_{max} は 4 、確率 p は 0.3 でシミュレーションを行った。平均密度は上から順に 0.16 , 0.32 , 0.55 , 0.77 , 0.87 となっている。

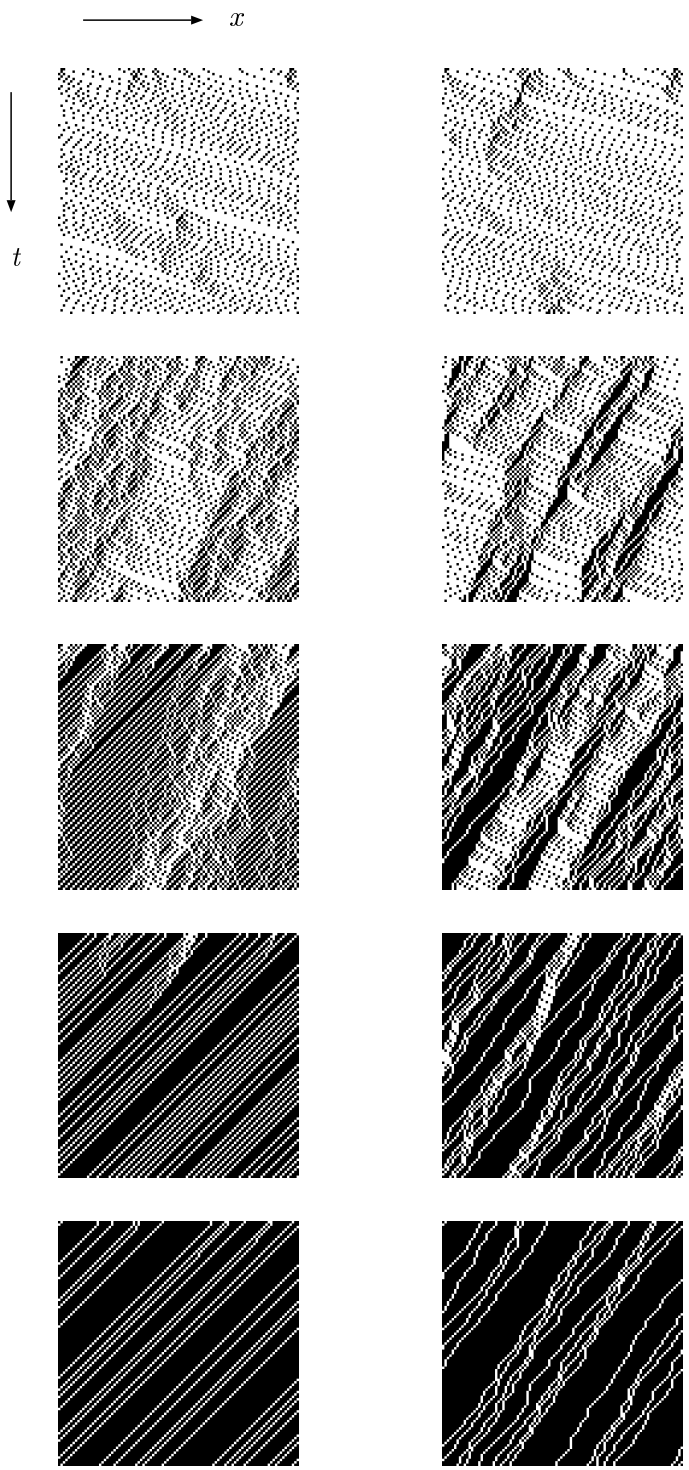

Fig. 4.1 K.Nagel ,M.Schreckenberg によるモデルシミュレーション例

単純に比較すると、右側のシミュレーション結果が、左の結果よりも、混んでいるところと空いているところが非常にはっきりと表れている。混んでいる、空いている、を知るにはこのモデルのほうが向いているのではないかと思う。

前項ルール (A) 1. , 2. , 4. だけの規則では、加速と減速があるために実際にかなり近づいているように見えるかもしれないが、シミュレーションを行ってみた結果、どのような状態でも数ステップの後に進行波へと移行してしまい、交通流が定常的になってしまう (Fig. 4.2)。これは実際の交通を模擬しているとはいえないために、確率による減速を取り入れることによって、進行波の流れを崩し、交通流は定常的なものではない、ということを再現したモデルが K.Nagel と M.Schreckenberg のモデルではないかと思う。また、この確率を更新前の速度に適用する前項ルール (A) では、中密度領域から高密度領域で多く見られる渋滞列が、形を変えずに後方に伝播していき、定常的な部分ができてしまうことになった。このようなことを踏まえて、K.Nagel と M.Schreckenberg のモデルとは、ルール (A) とルール (B) のどちらなのかを考えると、ルール (B) の、更新後の速度に確率 p を適用する方がドライバーの行動の不規則性をより表しているのではないか、と考えられる。

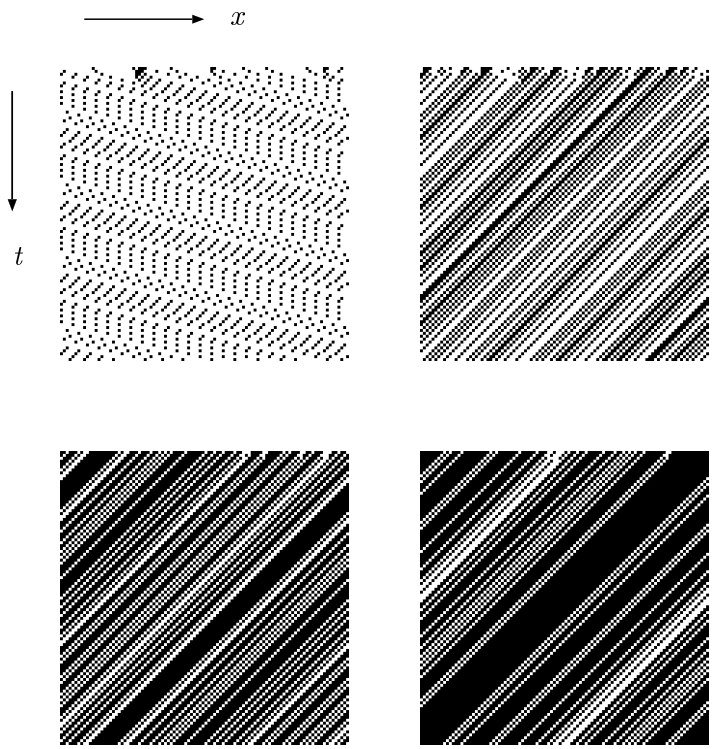

Fig. 4.2 加速と減速だけのルール

5　様々なシミュレーション

K.Nagel と M.Schreckenberg のモデルをもとに、さらに改良を重ねてみる。ここでのシミュレーションの更新のルールは 4.1.1 のルール (B) を用い、境界条件は周期境界条件を用いるものとする。

5.1　確率 p の変化による影響

実際の交通では、カーブや登り坂などによる速度の減速、あるいは信号、一時停止などによる車の停止、により、その後ろに渋滞が発生するという状況が当然考えられる。K.Nagel , M.Schreckenberg のモデルで「確率による減速」のルールがあるが、この確率を上げることによって、速度の減速をよりこの状況に近づけることはできないだろうか。

5.1.1　シミュレーション結果

確率 p を変えることにより、どのような結果が得られるか見ていく。確率はそれぞれ $(1)p = 0$ 、$(2)p = 0.1$ 、$(3)p = 0.3$ 、$(4)p = 0.5$ 、$(5)p = 0.7$ 、$(6)p = 0.9$ である。初期速度、初期配置はすべて同じものを用い、100 ステップ × 100 セル、最高速度 v_{max} は 5 、平均密度は 0.4 である。

5.1.2　考察

Fig. 5.1 の結果から考察する。確率が上がるにつれ渋滞列がはっきりと表れてきて、その長さも長くなっているが、(6) 確率 0.9 の結果は (5) 確率 0.7 の結果に比べ、渋滞列の数は多いようだが、長さは短いようである。これは確率が上がったことによって、渋滞列の先頭がこの渋滞列から抜ける確率が低くなると同時に、後ろから渋滞列に加わる確率も低くなるために、結果として渋滞列の長さはそれほど長くはならないから、と考えられる。また、確率が上がることで渋滞列が増えるために、空いているところもはっきりと表れてくる。(6) はこれが顕著に表れている。

この結果とこのモデルのルールをみると、車は、加速する条件が満たされている場合、一旦動き出してしまえば加速する条件を満たさなくなるまで、速度が 0 になることはない。これはいくら確率を上げても同じことである。確率を上げることにより平均速度は落ちるものの、止まったままでいる確率も上がってしまうために、これでは実際の交通を模擬しているとはいえないようである。

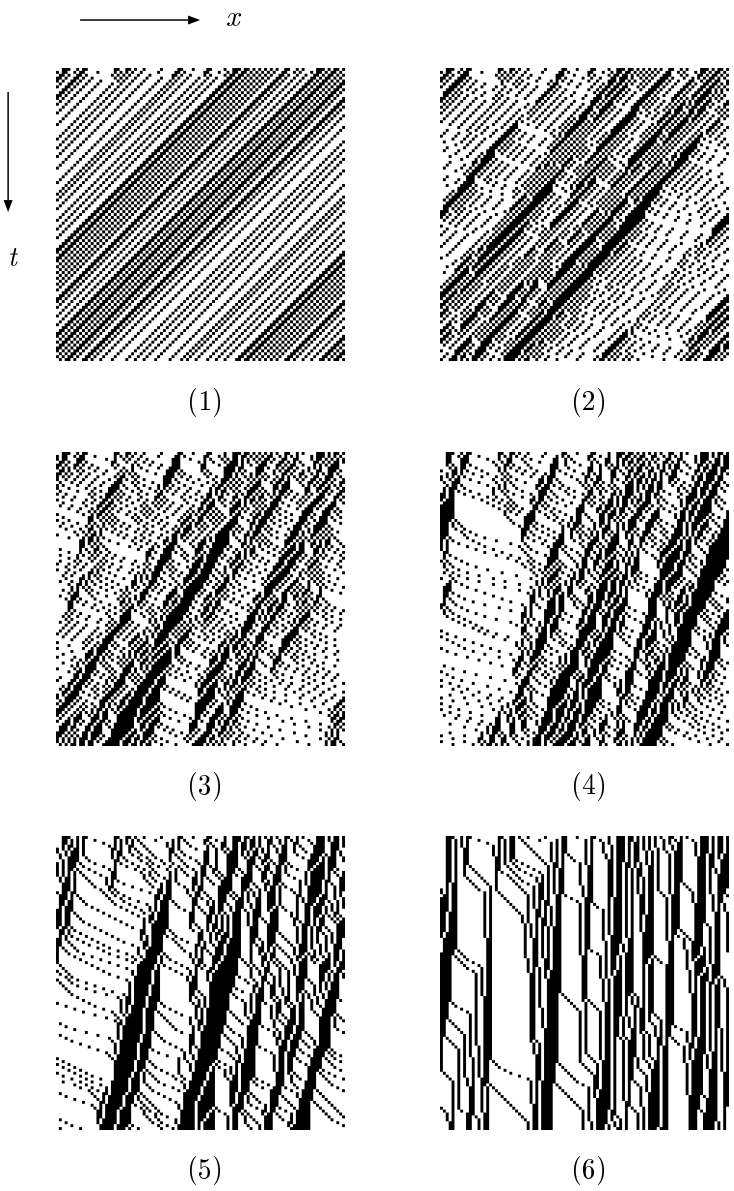

Fig. 5.1 確率 p の違いによるシミュレーション

5.2 最高速度制限を区間によって変化させた場合の影響

実際の交通は、普通の道路なら、最高速度は 30 [km/h] から 60 [km/h] 、高速道路は 50 [km/h]、70 [km/h]、80 [km/h]、100 [km/h]、というように、道路状況や車線の数、見通しの良さ、坂やカーブなど様々な条件を考えた上で、最高速度がそれぞれ場所により決められている。これをセルオートマトンモデルで実装して、前節でできなかった登り坂をこの方法で実現できないだろうか。例えば、登り坂の手前までは最高速度制限は 5 とし、登り坂が始まるところから先はそれ以下の最高速度にするのである。この方法でシミュレーションを行う。

5.2.1 シミュレーション結果

シミュレーション結果を Fig. 5.2 に示す。大きさは 100 ステップ × 100 セルであり、左側はすべてのセルが最高速度 5 、右側は左半分のセルが最高速度 5 、右半分が最高速度 2 とした。 比較のために初期状態 (0 ステップ目) は同じものである。確率 p は 0.3 とし、密度は上から順に 0.16 , 0.31 , 0.5 , 0.82 となっている。

5.2.2 考察

Fig. 5.2 の結果から考察する。上の 2 つは最高速度制限の変化を見ることができるが、下の 2 つはよく分からない。最高速度制限が変わっても全体にほとんど影響はないようである。渋滞列も最高速度制限の変化に関係なくあちこちで起こっている。もう少し幅を広げて見てみないとはっきりとは分からないようである。

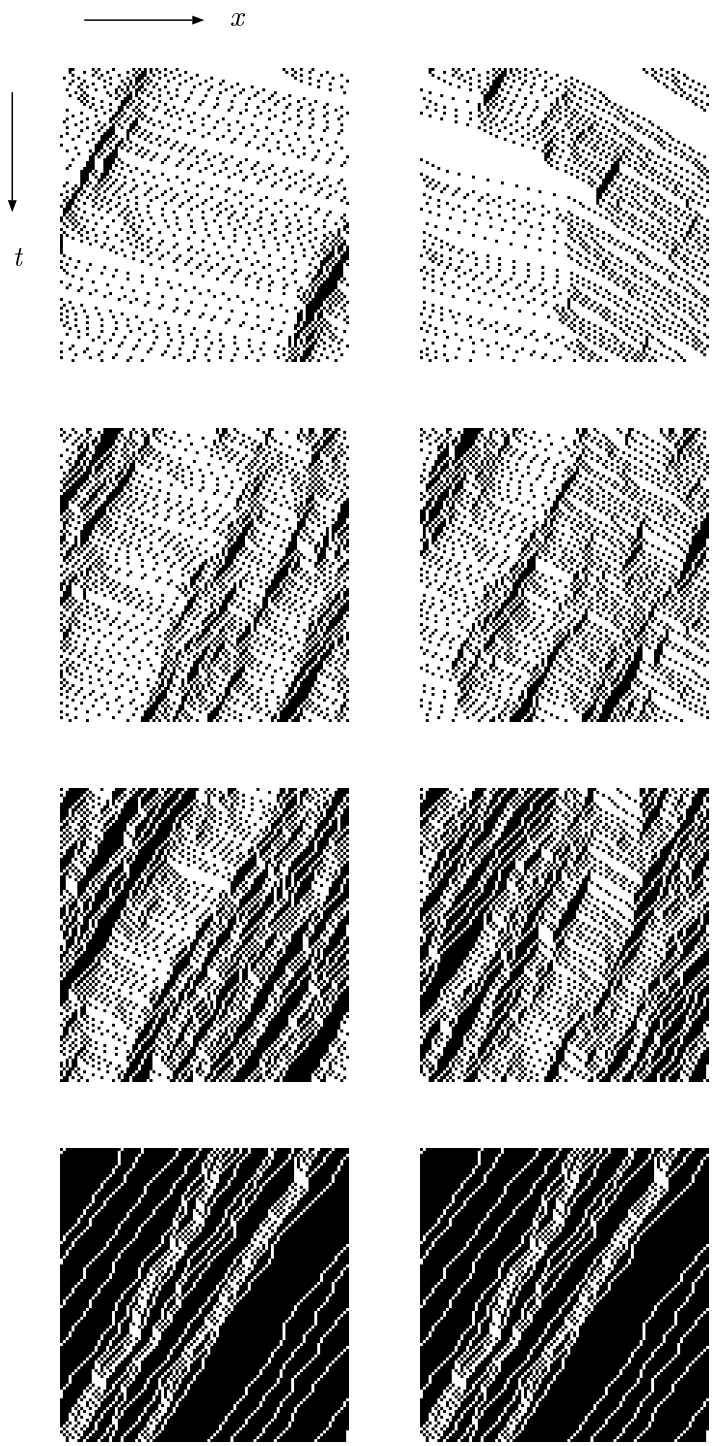

Fig. 5.2 最高速度を区間により制限

5.3　最高速度制限を区間によって変化させた場合の影響 (2)

前節のシミュレーションは、100 × 100 で行ったが、もう少し幅を広げ、長い区間、長いステップでの車の挙動を見てみる。

5.3.1　シミュレーション結果

300 × 300 で実装した結果を Fig. 5.3 , Fig. 5.4 に示す。左側はすべてのセルが最高速度 4 、右側は区間を 3 つに分け、左から 1 番目から 100 番目までのセルと 1 番右端の 300 番目のセルでの最高速度は 4 、101 番目から 200 番目までのセルが最高速度 8 、201 番目から 299 番目までのセルが最高速度 2 である。密度は Fig. 5.3 の上が 0.2 、下が 0.4 、Fig. 5.4 の上が 0.6 、下が 0.8 である。

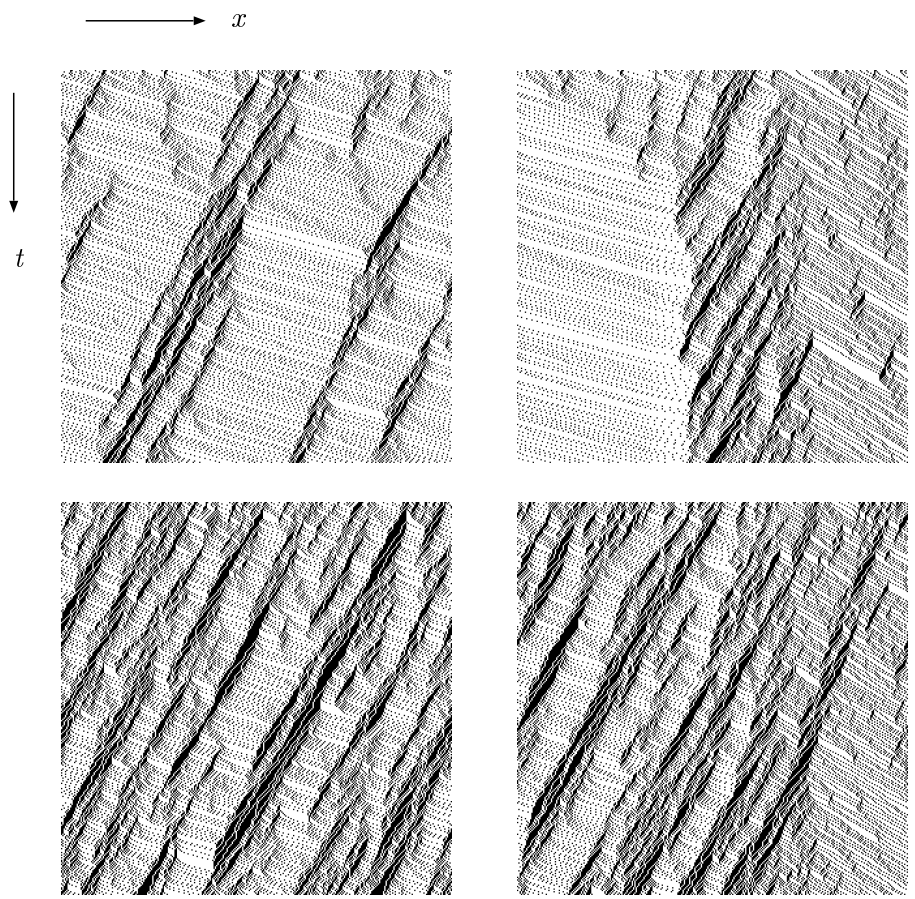

Fig. 5.3　最高速度を区間により制限 (2)

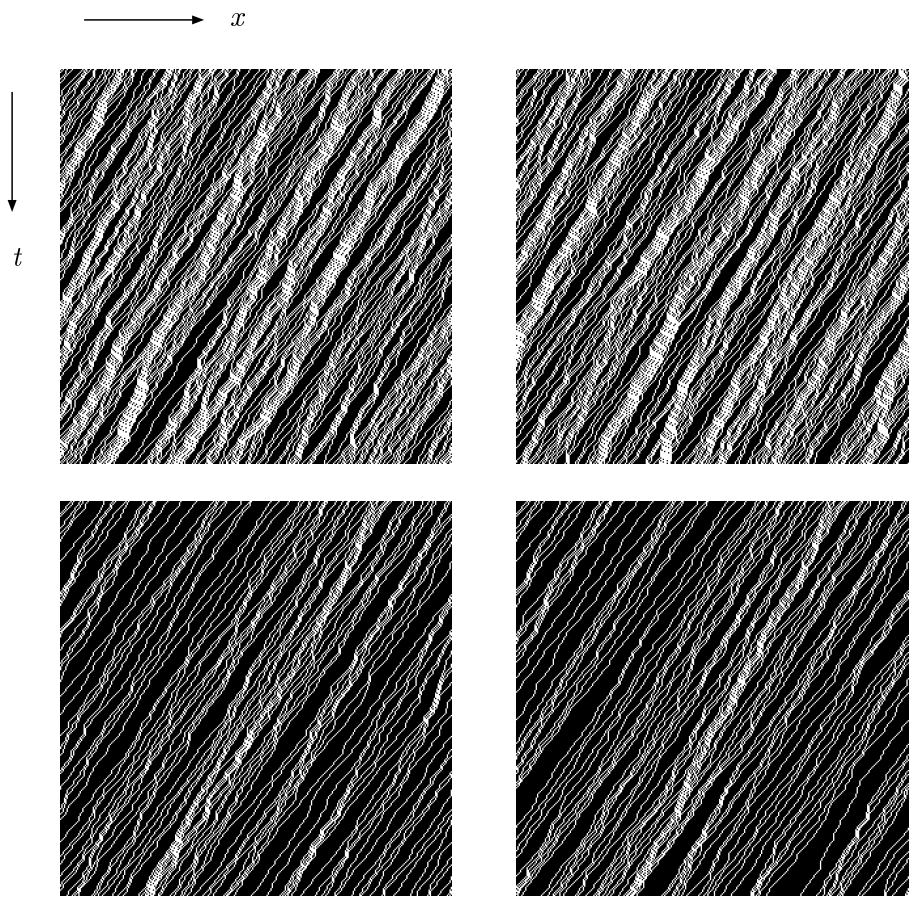

Fig. 5.4 最高速度を区間により制限 (2)

5.3.2 考察

左と右を比較して、はっきりと違いが表れているのは Fig. 5.3 上の密度 0.2 のデータだけである。このデータについて見てみる。

右のデータで、区間の境界がおおよその位置だが見てとることができる。最高速度 4 の区間から最高速度 8 の区間に入った速度 4 の車は前が空いていれば 4 から 5 、5 から 6 へと加速していく。しかし、その先には、最高速度 2 の区間があるために、この区間に入った途端、ガクッとスピードを落とさなくてはならない。これにより、最高速度 2 の区間の手前に渋滞が起こり始める。(Fig. 5.5)

最高速度 2 の区間にいる車は、速度として 0 、1 、2 の 3 つの値しかとらない。速度 2 の車に、確率による減速あるいは前に車がいることによる減速が適用されると速度は 1 になるが、加速は適用されることはない。よって最高で速度 2 までしか上がらない区間での平均速度は、その他の区間の平均速度よりはるかに遅いものとなる。最高速度 2 の区

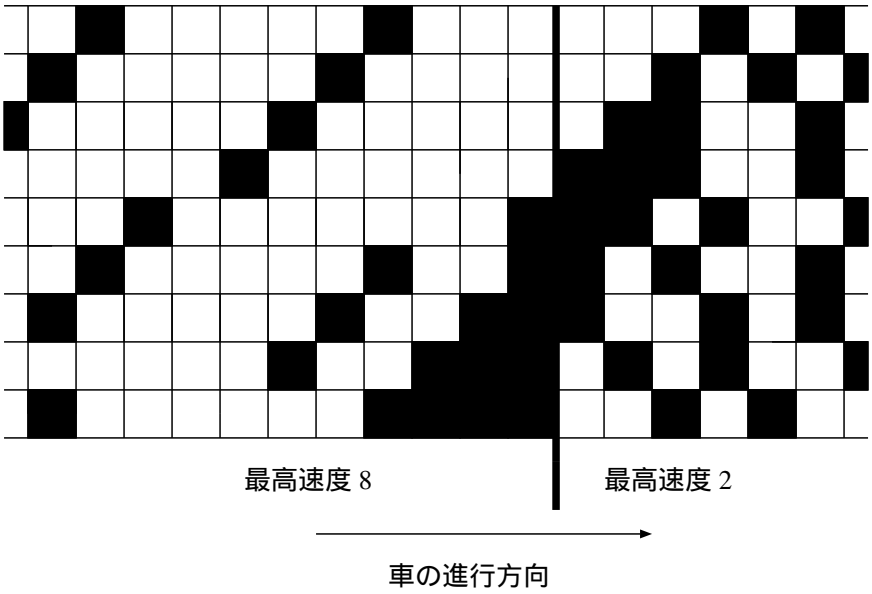

Fig. 5.5 区間の境界で起こる渋滞

間の手前の区間が最高速度 8 なので、後ろからどんどんと車が最高速度 2 の区間に入ってくるが、最高速度 2 の区間の平均速度が遅いために流れが悪く、その結果最高速度 2 の区間の入口付近から後方に渋滞を起こしてしまうのである。この密度 0.2 の結果は多少坂による影響を与えてくれるのではないかという気がする。

しかし、これ以外の結果では最高速度の影響はほとんど関係なく、あちこちで渋滞が起こっているようである。それぞれの場合の密度で何度か繰り返しシミュレーションしてみたが、同じような結果となった。このことから、中密度から高密度の領域では、区間によって最高速度を制限してもあまり意味のないものであることがわかる。車の密度がある程度大きくなってくると、加速していっても最高速度に達する前に前の車に追い付いてしまい、最高速度の意味がないものになってしまうからだろうと推測される。そうすると、このシミュレーションも坂を実現している、とはっきりとはいえないようである。

6 まとめ

本稿では、交通流を粒子モデルから解析していくことを目的として、セルオートマトンモデルについて述べてきた。はじめに、セルオートマトンモデルの基本量について考えたが、セルオートマトンモデルは、 1 つ 1 つのセル、という区間の考え方や、時間を不連続的なもので考えているため、流体モデルの基本量の定義がそのまま使うことができなかった。そこで、進行波というものを考え、セルオートマトンモデルの時間の流れを形の変わらない波でとらえ、その中での平均的な密度、速度、交通量を考えることで定義し、また流体モデルと同じように、速度、交通量を密度のみの関数で表し、セルオートマトン

モデルでの基本図を作成した。この図と、セルオートマトンモデルのシミュレーションの結果から、密度 0.5 を臨界密度として、自由流から混雑流へ、また混雑流から自由流への移り変わりとセルオートマトンモデルの自己組織化を見ることができた。また、事故による渋滞の考察を行ない、事故渋滞は、中密度においては事故がないときの渋滞とは全く異なるということ、低密度においては事故現場付近での局所的渋滞が起こるだけであり、車の流れにほとんど影響が出ていないこと、高密度では渋滞が既にあるために、低密度と同じように事故が車の流れにほとんど影響を及ぼしていないことを見ることができた。

次に、K.Nagel と M.Schreckenberg による、加速と減速のルールを取り入れたモデルを考え、このモデルの、 4 つのルールの解釈の仕方によって車の更新後の速度が変わることを述べ、またシミュレーション結果でそれを確認した。

その後、実際の道路に存在する登り坂をセルオートマトンモデルで実現できないか考えた。登り坂による影響は、そこにさしかかることで速度が落ちる。また登り坂途中での平均速度も遅くなるはずなので、最高速度制限を変化させることで実現できそうだが、低い密度のところで多少その影響が見られたものの、中密度、高密度では見ることができなかった。この方法で登り坂を実現するということは難しいということがわかった。

セルオートマトンモデルはプログラムに条件を書き込むことで、様々な条件下でのシミュレーションを行うことができる。今回は登り坂に焦点を絞ってその実現を試みたが、途中で終ってしまったのでこれを実現すること、またカーブでも坂と同じような影響が考えられるので、坂、そしてカーブによる影響をセルオートマトンモデルでシミュレーションすることが今後の課題であると思う。

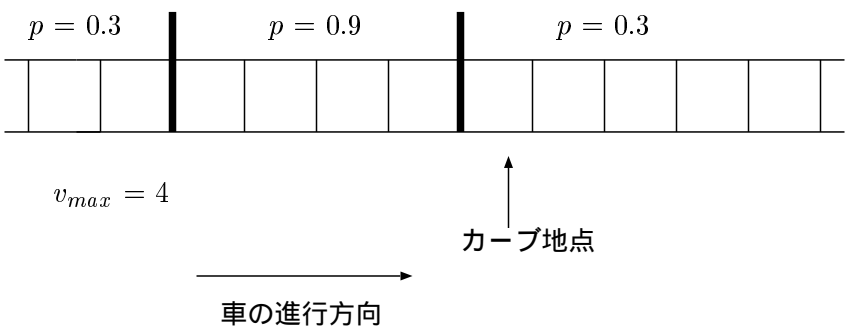

Fig. 6.1 カーブの実現

参考文献

[1] R.Harberman : “*MATHMATICAL MODEL : TRAFFIC FLOW* ”, (中井暉久 訳 , 現代数学社 , 1981)

[2] 西田匡佑 : “ 停止距離から導かれる交通流の数学モデルとその数値解析 ”, 新潟工科大学工学部情報電子工学科卒業論文 , pp 1-5 (1999)

[3] 湯川諭 : “ 計算物理学および統計力学的手法をもちいた一次元交通流の研究 – 交通渋滞の統計力学– ”, 大阪大学大学院理学研究科修士論文 , pp 15-29 (1995)

[4] 長谷隆 : “ 交通渋滞はなぜ起こるか ”, 科学 66 , pp 617-624 (1996)

[5] 坂東昌子、中西健一、中山章宏 : 集団運動の数理 (森北出版 , 1999) 第 4 回

[6] 加藤恭義 , 光成友孝 , 築山洋 : セルオートマトン法 – 複雑系の自己組織化と超並列処理– (森北出版 , 1998) , 第 2 章